

Propriedades fotométricas de fontes de luz

Ângelo Silva¹, Diogo Gomes², João Ribeiro³

¹100162, angelosilva@ua.pt; ²93025, diogo.mf.gomes@ua.pt; ³109952, joao.pribeiro@ua.pt

Resumo: Neste trabalho foram estudadas propriedades fotométricas de diversas fontes de luz recorrendo ao software *ColorCalculator* da *OSRAM*. Numa primeira fase foram analisadas as propriedades fotométricas de fontes de luz (LEDs) já incluídas no ambiente de trabalho do software, bem como a combinação de cores de dois LEDs e a influência da potência de cada um para as coordenadas da cor resultante. Otimizando a potência de cada LED foi possível obter cor branca. Numa segunda fase foram analisadas algumas fontes de luz reais, como LEDs e um laser disponíveis em laboratório. Os resultados das propriedades fotométricas das fontes reais foram discutidos e comparados com os obtidos para as fontes de luz incluídas no software.

Palavras-chave: CIE (*Comission Internationale de l'Eclairage*), LED, propriedades fotométricas.

I. INTRODUÇÃO

O primeiro contacto para análise de medidas de cor datam ao século XX, onde Herbert E. Ives, em 1910, afirma que, a cor desempenha um papel fulcral na compreensão dos efeitos físicos produzidos pela luz "artificial" [6]. Os métodos usados para medição da cor de fontes de luz consistiam em processos de radiometria espectral e de colorimetria [6]. O método de radiometria espectral centrava-se na medição da intensidade relativa de várias fontes de luz em função da variação do comprimento de onda, enquanto o método colorimétrico introduziu novos meios de medição de propriedades intrínsecas de fontes de luz, onde a cor correspondente a cada fonte de luz é associada por métodos de "mistura" de cores. O método colorimétrico surgiu como válido dado considerar-se que, fontes que produziam a mesma cor, têm efeitos idênticos em combinação de cores, independentemente da sua composição espectral [6]. No entanto, a distorção de cor que ocorre devido a diferenças espectrais, em fontes de luz da mesma cor e variações da cor produzida detetada pelo olho humano (e a consequente adaptação do olho à alteração de cor), tornaram-se problemas essenciais associados à reprodução de cor [6].

A Comissão internacional de iluminação (mundialmente denominada por *Comission Internationale de l'Eclairage* (CIE)) explora o desenvolvimento matemático de representação de espaços de cor. O atual método de caracterização centra-se no índice de interpretação de cores (CRI, proveniente do conceito inglês *Colour rendering index*), introduzido em 1974 [3].

O método CIE xyY para representação do espaço de cores, introduzido em 1931, usa tristímulos X,Y,Z associados à região do vermelho, verde e azul, necessários para correspondência da cor da amostra [3]. Deste modo, permitiu criar-se um espaço bidimensional correspondente ao diagrama de cromaticidade (independente da luminosidade Y), onde (x,y) correspondem às coordenadas de cromaticidade, tal como ilustra a figura 1.

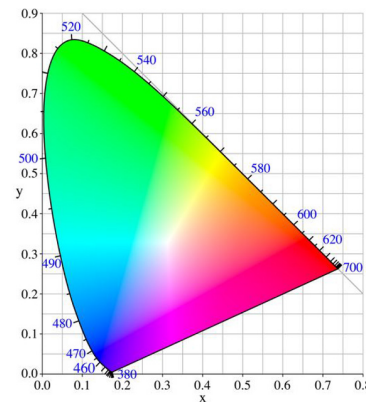


Fig. 1: Representação do método CIE xyY. Adaptado de [5].

Assim, o CIE abordou a eficiência luminosa do olho humano. Avaliou a sensibilidade/resposta do olho humano face a uma gama de cores espectrais quer sob condições diurnas, visão fotópica, quer sob condições noturnas, visão escotópica. A figura 2 ilustra a eficiência luminosa espectral do olho humano.

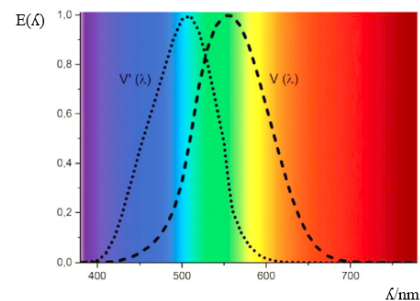


Fig. 2: Representação da curva de eficiência luminosa CIE: $V(\lambda)$ associado à visão fotópica e $V'(\lambda)$ correspondente à visão escotópica. Adaptado de [1].

Os LEDs devido às suas características únicas, nomeadamente o seu rendimento quântico e a sua capacidade de

apresentar FWHM bem definidas, tornam-se dispositivos fisicamente únicos para medição de propriedades fotométricas e assim, abordar no espaço de cor xyY [4]. No entanto, devido à existência de poucos componentes com comprimentos de onda a emitir na região do infravermelho (análise espectral $\lambda \sim 750$ nm), torna-se difícil obter dispositivos com propriedades de interpretação de cores alta [4]. A solução adotada passou por emitir luz branca por combinação multicolor de LEDs.

II. DESCRIÇÃO DA MONTAGEM EXPERIMENTAL

Um esquema da montagem usada para a obtenção de espectros de fontes de luz reais pode ser consultado na figura 3. Neste, (a) representa a fonte de emissão luminosa, (b) a entrada da fibra ótica ligada ao sistema de aquisição de dados, e (c) o sistema de aquisição de dados (conectado a um espectrómetro).

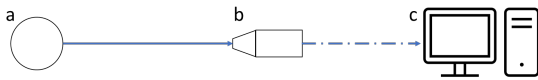


Fig. 3: Montagem experimental: a) Fonte de emissão luminosa; b) Entrada da fibra ótica; c) Sistema de aquisição de dados.

III. PROCEDIMENTO

Inicialmente, recorrendo ao software *ColorCalculator* da *OSRAM*, fez-se o estudo de algumas propriedades fotométricas de LEDs já incluídos no ambiente de trabalho do mesmo. Primeiro, determinou-se o fluxo luminoso, coordenadas de cor no espaço xyY, comprimento de onda dominante, largura a meia altura, pureza e comprimento de onda de pico para quatro LEDs distintos: LEDs vermelho (640 nm), azul (440 e 455 nm) e verde (530 nm), cada um a operar a uma potência de 5 mW.

Posteriormente, a partir dos pares de coordenadas de cores de dois LEDs desconhecidos, determinou-se o comprimento de onda dominante e pureza de cada um. Foram calculadas as coordenadas da cor resultante da combinação dos dois LEDs, bem como estudada a influência da potência de cada LED nestas coordenadas de cor. Otimizando a potência de cada LED ainda foi possível obter uma cor resultante branca.

Por fim, repetiu-se o estudo inicial para fontes de luz reais. Foram adquiridos espectros através de um espectrómetro, sendo estes importados para o software *ColorCalculator*, fornecendo os dados das propriedades fotométricas das fontes de luz testadas. As fontes de luz testadas em laboratório foram LEDs vermelho, verde e azul, com uma tensão aplicada de 5 e 3,3 V, e um LED de infravermelho, com uma tensão aplicada desconhecida. Para além disso, também foi estudado um laser de 650 nm. Os LEDs vermelho, verde e azul foram alimentados através do microcontrolador *Arduino Uno*.

IV. RESULTADOS E ANÁLISE

A. Estudo das propriedades fotométricas de LEDs

Na tabela I é possível observar os dados relativos às propriedades fotométricas de cada LED incluído no ambiente

de trabalho do software. Embora todos os LEDs tenham sido definidos no software a operar com uma potência de 5 mW, foram observados valores de fluxo luminoso (Φ_v) diferentes para cada LED. O LED verde apresentou o maior valor de fluxo luminoso (2,54 lm), enquanto que o LED azul (440 nm) o menor (0,037 lm). O fluxo luminoso é o equivalente fotométrico da potência, e é dependente da curva de eficiência luminosa CIE (ver figura 2). Desta forma, assumindo visão fotópica, a eficiência luminosa espectral é mais elevada para comprimentos de onda na zona do verde (com máximo nos 555 nm) e mais reduzida para comprimentos de onda na ordem dos 400-490 nm (violeta-azul) e 640-700 nm (vermelho). Posto isto, os valores obtidos de fluxo luminoso de cada LED revelam-se de acordo com o perfil da curva de eficiência luminosa CIE, observando-se o maior valor de fluxo luminoso para o comprimento de onda mais sensível ao olho humano (verde), e o menor para o comprimento de onda menos sensível dos LEDs testados (azul). Para além disso, observa-se que entre dois LEDs da mesma cor, azul, o de comprimento de onda de 455 nm apresenta o maior valor de fluxo luminoso, uma vez que a eficiência luminosa espectral é ligeiramente superior para 455 nm do que para 440 nm (ver figura 2).

Uma característica que se pode verificar é que para todos os LEDs, λ_{dom} e λ_{pico} apresentam valores diferentes. A partir da figura 4 é possível distinguir e explicar a diferença destes dois comprimentos de onda. O λ_{pico} corresponde ao comprimento de onda do máximo de intensidade da emissão radiométrica da fonte de luz (neste caso o LED), não representando a emissão da fonte de luz percebida pelo olho humano, mas sim por fotodetetores. Por outro lado, o λ_{dom} corresponde ao comprimento de onda que a fonte de luz emite que é mais sensível ao olho humano. Através da análise da figura 4 e da tabela I, constata-se que o λ_{pico} corresponde ao comprimento de onda associado ao valor máximo de emissão do respetivo LED e o λ_{dom} encontra-se fortemente relacionado com a curva de eficiência luminosa CIE, sendo o seu valor próximo ao ponto de interseção da curva de emissão do LED com a curva de eficiência luminosa CIE.

A pureza da cor é um dos parâmetros mais importantes na caracterização das propriedades fotométricas de LEDs. Pode ser obtida através da expressão (1) [7]:

$$\text{Pureza (\%)} = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{\sqrt{(x_d - x_i)^2 + (y_d - y_i)^2}} \times 100 \quad (1)$$

sendo $(x; y)$ as coordenadas de cromaticidade do LED, $(x_i; y_i) = (0,3333; 0,3333)$ e $(x_d; y_d)$ as coordenadas de cromaticidade do λ_{dom} .

Verificou-se que o LED vermelho, o que apresentou menor valor de FWHM (14,2 nm), revelou-se o com maior pureza de cor (100%), enquanto que o LED verde, com maior valor de FWHM (36,7 nm), o com menor pureza de cor (82,8%). De facto, para todos os LEDs verificou-se uma diminuição da pureza com o aumento da FWHM. Através do estudo em [9], observa-se que de facto o aumento da FWHM de fontes de luz diminui a sua pureza de cor, tendo um comportamento não linear. O comprimento de onda dominante também se revelou dependente da FWHM, diminuindo para gamas de comprimento maiores (580-680 nm) e aumentando para gamas

Tabela I: Dados de propriedades fotométricas de fontes de luz incluídas no ambiente de trabalho do software *ColorCalculator* da *OSRAM*.

Fonte	Potência (mW)	Φ_v (lm)	x	y	λ_{dom} (nm)	λ_{pico} (nm)	Pureza (%)	FWHM (nm)
LED azul (455 nm)	5	0,189	0,1544	0,0287	455,0	450,4	98,1	23,2
LED azul (440 nm)	5	0,037	0,1659	0,0146	440,5	418,0	98,9	20,2
LED verde (530 nm)	5	2,540	0,1852	0,7247	530,0	527,6	82,8	36,7
LED vermelho (640 nm)	5	0,418	0,7189	0,2811	639,9	649,5	100,0	14,2

de comprimento de onda menores (430-555 nm) com o aumento da FWHM.

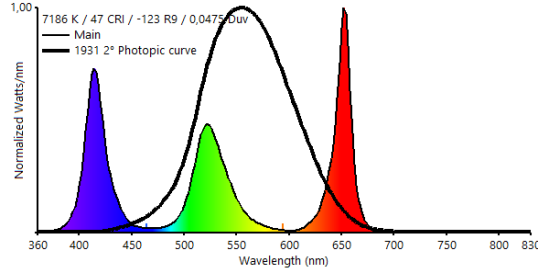


Fig. 4: Espectro de emissão dos LEDs azul (440 nm), verde (530 nm) e vermelho (640 nm), com a sobreposição da curva de eficiência luminosa CIE 1931, para a visão fotópica.

B. Combinação de dois LEDs

Para as coordenadas de cor de dois LEDs, foram determinados os seus λ_{dom} e respetivas purezas de cor. Estes dados encontram-se representados na tabela II. Observa-se que estes dois LEDs apresentam comprimentos de onda dominantes bastante distintos (azul e vermelho), com o LED vermelho a apresentar uma pureza de cor 17,5 % superior ao do azul.

Tabela II: Comprimento de onda dominante e pureza dos LEDs com coordenadas de cor $(x_1; y_1)$ e $(x_2; y_2)$.

x_1	0,0775	$\lambda_{dom} = 495,0$ nm	Pureza = 82,5%
y_1	0,3987		
x_2	0,7189	$\lambda_{dom} = 639,8$ nm	Pureza = 100,0%
y_2	0,2811		

Através da combinação dos dois LEDs, com cada um a operar a uma potência de 5 mW, foi obtida uma cor resultante com coordenadas $(x; y) = (0,2956; 0,3588)$. Mantendo os comprimentos de onda dominantes fixos, foram alterados os valores de potência de cada LED, de modo a estudar a influência da potência nas coordenadas de cor resultante.

Como observado na tabela III, à medida que é aumentada a potência do LED 1 (com coordenadas $(x_1; y_1)$) e mantida a potência do LED 2 (com coordenadas $(x_2; y_2)$) constante, é observado um desvio das coordenadas de cor resultante em direção às coordenadas do LED 1. Da mesma maneira, quando é aumentada a potência do LED 2 e mantida a potência do LED 1 constante, as coordenadas de cor resultante desviam-se em direção às coordenadas do LED 2. No caso mais extremo, quando $P_2 = 100P_1$, as coordenadas de cor resultante tomam valores muito próximos das coordenadas de cor do LED 2. Como conseguinte, constata-se que as

coordenadas de cor resultante de uma combinação de fontes de luz (neste caso estudado apenas 2), apresentam uma forte dependência da potência de cada uma. Aumentando a potência de uma dada fonte de luz em relação às outras permite desviar as coordenadas da cor resultante em direção das coordenadas dessa mesma fonte de luz.

Tabela III: Valores das coordenadas de cor resultante da combinação dos dois LEDs, para valores de potência diferentes dos LEDs.

P_1 (mW)	P_2 (mW)	x	y
5	5	0,2956	0,3588
15	5	0,1715	0,3815
25	5	0,1374	0,3877
5	15	0,4669	0,3274
5	25	0,5394	0,3141
5	500	0,7065	0,2835

Por fim, ajustando a potência de cada LED, obtiveram-se as coordenadas de cor resultante próximas do branco $(x; y) = (0,3347; 0,3516)$ para $(P_1; P_2) = (5; 6,5)$ mW. Observou-se no diagrama de cromaticidade CIE as coordenadas de cor resultante a sobreporem a região da cor branca. Às cores combinadas dos dois LEDs dá-se o nome de cores complementares, uma vez que a sua mistura origina o branco [8].

C. Análise de espectros de fontes de luz reais

Como descrito na secção III, foram adquiridos valores de propriedades fotométricas de fontes reais de luz presentes em laboratório. Estes dados encontram-se representados na tabela IV. Uma vez que as medidas fornecidas pelo software *ColorCalculator* de potência e fluxo luminoso não se encontram calibradas, consideram-se estas com unidades arbitrárias.

Pode-se constatar que, para todos os LEDs, o aumento da tensão (3,3 V para 5 V) é traduzido no aumento do fluxo luminoso, o que se encontra dentro do esperado, uma vez que para maiores valores de tensão é fornecida uma maior potência ao LED. Para além disso, com o aumento da tensão foram obtidos valores de pureza de cor maiores, o que possivelmente estará relacionado com a variação da FWHM para diferentes valores de tensão. No entanto, a diminuição da FWHM para uma tensão de 5 V, como no LED verde e vermelho, não faz de todo sentido, uma vez que para maiores valores de tensão, o LED será alimentado com maior valor de corrente elétrica, sendo esperado o aumento da FWHM com o aumento da corrente elétrica [2]. Desta forma, conclui-se que os espectros adquiridos não foram satisfatórios, apresentando alguns bastante ruído, como o caso do LED verde a 3,3 V,

Tabela IV: Dados de propriedades fotométricas de fontes de luz reais testadas em laboratório.

Fonte	Potência ($\times 10^7$ arb)	Φ_v ($\times 10^6$ arb)	x	y	λ_{dom} (nm)	λ_{pico} (nm)	Pureza (%)	FWHM (nm)
LED verde (3,3 V)	4,14	9,08	0,3558	0,3979	566,4	591,6	26,3	20,9
LED verde (5 V)	8,09	33,47	0,4192	0,4936	570,7	571,6	74,1	13,5
LED azul (3,3 V)	7,31	8,36	0,1909	0,1380	468,5	526,5	69,3	29,8
LED azul (5 V)	14,35	12,46	0,1610	0,0878	466,9	494,5	85,4	38,6
LED vermelho (3,3 V)	14,35	13,79	0,5474	0,3188	619,7	642,5	59,9	39,5
LED vermelho (5 V)	13,94	22,38	0,6049	0,3126	621,3	624,3	75,3	24,0
LED infravermelho	3,76	5,79	0,3325	0,3333	491,5	880,4	0,3	48,1
Laser 650 nm	5,58	7,08	0,4597	0,3408	604,9	622,7	40,2	5,3

contribuindo assim para um valor de pureza calculado baixo (26,3 %).

No entanto, observa-se que mesmo o LED verde apresentando uma potência menor que o azul, este exibe um fluxo luminoso maior, dado ao facto da cor verde ser mais sensível ao olho humano do que a azul. O software exibiu um comportamento estranho para o LED infravermelho, já que calculou coordenadas de cor, o que não faz sentido, uma vez que este não se encontra na região do visível. Embora distinguido dos LEDs por ter uma FWHM bem mais reduzida, o laser apresentou uma FWHM relativamente alta para um dispositivo deste tipo (5,3 nm), contribuindo assim para uma disparidade entre o seu λ_{dom} e λ_{pico} . Um laser com uma FWHM bastante reduzida apresentará um λ_{dom} muito próximo do λ_{pico} .

Comparando com os resultados obtidos na secção IV-A, observa-se que as fontes de luz reais apresentaram valores de pureza de cor bastante menores. É de notar que as fontes de luz do software apresentavam espectros sem ruído, enquanto que na prática é inevitável que haja ruído nos espectros das fontes de luz reais, levando à obtenção de valores de pureza menores.

V. CONCLUSÃO

Através desta atividade experimental foi possível estudar as propriedades fotométricas de fontes de luz incluídas no ambiente de trabalho do software *ColorCalculator* da *OSRAM* (LEDs) bem como usar partido deste para o estudo de fontes de luz reais, como LEDs e um laser disponíveis em laboratório. Foi possível observar que entre LEDs verde, azul e vermelho a operar à mesma potência, o verde apresentou o maior fluxo luminoso, estando de acordo com a curva de eficiência luminosa CIE, que descreve que o olho humano é mais sensível à cor verde para condições diurnas. Na mistura de cores de dois LEDs, concluiu-se que aumentando a potência de um dos LEDs em relação à do outro permite desviar as coordenadas de cor resultante em direção às coordenadas desse mesmo LED. Na presença de cores complementares, constatou-se que a otimização da potência dessas cores permite obter uma cor branca.

No que diz respeito ao estudo das fontes de luz reais, observou-se o aumento do fluxo luminoso com o aumento da tensão de alimentação de LEDs, o que seria de esperar, embora foi observado a diminuição da FWHM com o aumento da tensão para o LED verde e o vermelho, o que não faz sentido, indicando que os espectros adquiridos não eram satisfatórios. Comparando com as fontes de luz do software

ColorCalculator, as fontes de luz reais apresentaram valores de pureza de cor bem menores, possivelmente devido ao ruído dos espectros adquiridos. Desta forma, retira-se que a qualidade dos espectros e a razão sinal ruído (SNR) das fontes de luz é um fator determinante para os resultados de parâmetros fotométricos.

REFERENCES

- [1] M. A. Haridy and A. Aslam. “Chapter 5: Optical Radiation Metrology and Uncertainty”. In: *Intech Open* (2018).
- [2] Mu-Jen Lai et al. “Yellow-green InGaN-based light emitting diodes with emission peak wavelength red shifts under low injection current”. In: *9th WSEAS International Conference on Microelectronics, Nanoelectronics, Optoelectronics, MINO '10* (Jan. 2010), pp. 52–55.
- [3] Cheng Li, Ming Ronnier Luo, and Changjun Li. “Evaluation of light sources based on visual colour rendering”. In: *Color and Imaging Conference*. Vol. 2008. 1. 2008, pp. 201–204.
- [4] Hongtao Li et al. “Wavelength dependence of colorimetric properties of lighting sources based on multi-color LEDs”. In: *Opt. Express* 21.3 (Feb. 2013), pp. 3775–3783. DOI: 10.1364/OE.21.003775.
- [5] O.E. Meslouhi et al. “Automatic detection and inpainting of specular reflections for colposcopic images”. In: 1 (Sept. 2011), pp. 341–354. DOI: 10.2478/s13537-011-0020-2.
- [6] DOROTHY Nickerson. “Measurement and specification of color rendition properties of light sources”. In: *Illuminating Engineering* 53.2 (1958), p. 77.
- [7] Yatish Parauha and S J Dhoble. “Enhancement of photoluminescence and tunable properties for Ce³⁺, Eu²⁺ activated Na₂CaSiO₄ downconversion phosphor:” in: *Journal of Luminescence* 251 (Aug. 2022), p. 119173. DOI: 10.1016/j.jlumin.2022.119173.
- [8] Ralph W. Pridmore. “Complementary colors: A literature review”. In: *Color Research & Application* 46.2 (2021), pp. 482–488. DOI: <https://doi.org/10.1002/col.22576>.
- [9] Qi Yao et al. “Relationship between Peak Wavelength and Dominant Wavelength of Light Sources Based on Vector-Based Dominant Wavelength Calculation Method”. In: *LEUKOS* 10 (Oct. 2013), pp. 11–18. DOI: 10.1080/15502724.2013.833823.